

【発明の名称】 パターン形成方法

【発明の背景】

本発明は、レジストパターンをマスクとして被エッチング膜をパターンニングするパターン形成方法に関し、特に、ArFエキシマレーザ光が持つ波長以下の露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンをマスクとしてドライエッチングを行なうパターン形成方法に関する。

半導体集積回路素子における微細加工方法として、レジスト材によりマスクパターンを形成し、それをマスクとしてエッチングを行なうことにより、被エッチング膜に所望の回路素子パターンを形成する方法が一般に用いられている。

このとき形成される回路素子パターンは、そのパターン寸法がマスクパターンの寸法に対してほぼ同一の寸法となるように、被エッチング膜の主面に対してほぼ垂直にエッチングされる（異方性エッチング）。

以下、従来の絶縁膜をエッチング対象としたパターン形成方法について図11（a）～図11（e）を参照しながら説明する（例えば、徳山巍編著「半導体ドライエッチング技術」産業図書株式会社、1992年10月、p. 81-89を参照。）。

まず、図11（a）に示すように、シリコンからなるウエハ101の上に、例えば熱酸化法又は気相成長法により、厚さが約20nmのシリコン酸化膜102を形成し、続いて、シリコン酸化膜102の上に、例えば化学的気相成長（CVD）法により、厚さが約20nmのポリシリコン膜103と、厚さが約120nmのシリコン窒化膜104とを順次成膜する。

次に、図11（b）に示すように、シリコン窒化膜104の上に、露光による反射を防止する反射防止膜105を形成する。反射防止膜105は、例えばプラズマCVD法によるシリコン酸窒化膜からなり、その膜厚は約40nmが適当である。また、反射防止膜105には、有機膜を用いることもでき、その場合の膜厚は約80nmが適当であり、塗布法によって成膜できる。

続いて、反射防止膜105の上に、KrFエキシマレーザ感光用のレジスト膜

106Aを約550nmの厚さで塗布し、レジスト膜106Aの上方に、半導体装置の回路パターンが形成されたフォトマスク（図示せず）を整列させた後、該フォトマスクを通過した露光光によってレジスト膜106Aを露光する。

次に、図11（c）に示すように、露光されたレジスト膜106Aを現像してレジストパターン106を形成する。

次に、図11（d）に示すように、形成されたレジストパターン106をエッチングマスクとして、反射防止膜105及びシリコン窒化膜104に対して、所定のエッチングガスを用いたドライエッチングを行なう。エッチングガスには、主として、エッチング作用を持つガスと、エッチング時の反応生成物からなる堆積物を生じるガスとを含む混合ガスを用いることにより、エッチング中に被エッチング膜（反射防止膜105及びシリコン窒化膜104）におけるパターン化されつつある各側面上に堆積物107が付着する。このとき、堆積物107の堆積量とエッチングガスによるエッチング速度とが釣り合うと、図11（e）に示すような、基板面に対してほぼ垂直なパターン形状を持つシリコン窒化膜104を得ることができる。

近年、半導体集積回路における半導体素子の微細化がますます進み、それに伴って、レジストパターンを露光する露光光の波長が短波長化してきている。従来は、回路パターンに要求される寸法に合わせて、例えば、水銀ランプの輝線であるg線（波長436nm）からi線（波長365nm）、さらには水銀ランプの輝線に代えてKrFエキシマレーザ光（波長248nm）が用いられるようになってきている。

しかしながら、線幅が130nmよりも小さい回路パターンを露光するには、波長が248nmのKrFエキシマレーザ光を用いることができない。そこで、さらに微細な回路パターンを露光する光源として、194nmの波長を持つArFエキシマレーザ光等が用いられようとしている。

g線又はi線に感光するレジストには、エッチング耐性を持つ材料としてノボラック等のベンゼン環系樹脂材を用いており、該樹脂材をArFエキシマレーザ光に用いると、該樹脂材はこの波長帯において強い吸収を持つ。このため、ArFエキシマレーザ感光用レジスト材には、アクリル系樹脂材が用いられることが

多い。

しかしながら、アクリル系樹脂材はベンゼン環系樹脂材のように強度が高くないことから、現像直後には良好なパターン形状を得られても、エッチング中にレジストパターンが倒れてしまう、いわゆるレジスト倒れが生じるという問題がある。

さらに、レジストパターンにおけるアスペクト比に関しても、KrFエキシマレーザ感光用レジスト材では、アスペクト比が3程度であり、これに対し、ArFエキシマレーザ感光用レジスト材では、アスペクト比が4程度で使用されることが多く、この点でもKrFエキシマレーザ感光用レジスト材よりもレジスト倒れが生じやすくなる。

【発明の概要】

本発明は、前記従来の問題に鑑み、ArFエキシマレーザ感光用のレジスト材からなるレジストパターンを用いるエッチング工程において、レジスト倒れを防止して被エッチング膜に異方性形状を確実に得ると共に、パターン寸法を制御できるようにすることを目的とする。

前記の目的を達成するため、本発明は、ArFエキシマレーザ光が持つ波長以下の露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを用いたパターン形成方法を、レジストパターンにおける少なくともウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面上に、相対的に厚い堆積物を堆積しながらエッチングするか、又は該両側面上に堆積物が堆積しないようにエッチングする構成とする。

本願発明者は、ArFエキシマレーザ光が持つ波長以下の露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンが、エッチング中にレジスト倒れについて種々検討した結果、以下のように原因を突き止めると共に知見をも得ている。

図1はArFエキシマレーザ感光用のレジストパターンを用いた場合であって、5通りのエッチング条件（A～E）ごとにレジストパターン寸法の初期値を変えながらそれぞれの寸法変換差をプロットした結果を示している。ここで、レジストパターン寸法とは、線形状を有するパターンの線幅をいい、また、同一のエッチング条件に係る寸法変換差の値はそれぞれ直線でないでいる。

図1に示すように、寸法変換差が4 nm～10 nm程度のエッチング条件A、Cの場合には、レジストパターンの初期値が130 nmよりも小さくなると、すべてのパターンにレジスト倒れが発生することが分かる。これに対し、寸法変換差が20 nm以上となるエッチング条件D又は-15 nm程度となるエッチング条件Eの場合には、いずれもレジスト倒れが発生しないことが分かる。

ここで、比較のためにKrFエキシマレーザ感光用のレジストパターンを用いた場合を説明する。

図2はKrFエキシマレーザ感光用のレジストパターンを用いた場合であって、5通りのエッチング条件（1～5）ごとにレジストパターン寸法の初期値を変えながらそれぞれの寸法変換差をプロットした結果を示している。ここでも、同一のエッチング条件に係る寸法変換差の値をそれぞれ直線でつないでいる。

図2に示すように、KrFエキシマレーザ感光用のレジストパターンを用いた場合には、すべてのレジストパターンにレジスト倒れが発生せず、レジストパターン寸法に対して±10 nm以内の寸法変換差となるように、レジストパターンの寸法を仕上げる事が可能である。

寸法変換差の値は、エッチング時に側壁に付着する堆積物の量に比例する。従って、寸法変換差が大きい条件とは、レジストパターンの側壁に堆積する堆積物（側壁堆積物）の堆積量が比較的に多いエッチング条件に等しい。すなわち、図1から分かるように、ArFエキシマレーザ感光用レジストの場合は、エッチング時に生じる側壁堆積物の堆積量をエッチング量よりも多くするか、又は側壁堆積物の堆積量をエッチング量よりも少なくすれば、レジスト倒れは発生しない。

そもそも、レジスト倒れが発生するのは、レジストパターンの両側部における応力の大きさが異なり、且つレジストが持つ強度以上に応力がかかった場合である。レジストパターンにかかる応力の発生源は、主にレジストパターンの熱による自己収縮によると考えられる。なお、レジストパターンがエッチング中にイオンにさらされることにより過熱されて収縮する現象は良く知られている。

図3（a）に示すように、一般に、線状パターン（ラインパターン）には、ウェハ101の径方向に対して垂直に配置された第1のラインパターン104Aと、径方向に対して平行に配置された第2のラインパターン104Bとがあり、径方

向に対して垂直に配置された第1のラインパターン104Aの場合に、ウエハ101の内側を向いた側面上には堆積物の付着量が多く、外側を向いた側面上には堆積物の付着量が少ない。その上、付着量の差は、ウエハ101の周縁部において特に顕著となる。すなわち、図3(a)に示すように、例えば、ウエハ101の結晶方向の判別に用いるノッチ101aを含む中心線をX軸とすると、X軸と直交するY軸と交差する両側面を持つ第1のラインパターン104Aのうち、ウエハ101の周縁部に形成されたパターンの内側の側面上により多くの堆積物が付着する。同様に、図3(b)に示す場合には、第1のラインパターン104A及び第2のラインパターン104Bのうち、X軸と交差する側面を持つ第1のラインパターン104Aのうち、ウエハ101の周縁部に形成されたパターンの内側の側面上により多くの堆積物が付着する。

以下、レジストが収縮する現象と併せて、レジスト倒れが発生する様子を図4(a)～図4(d)の断面図を用いて詳細に説明する。

まず、図4(a)に示すように、ウエハ101上のシリコン窒化膜104の上に、反射防止膜105を介在させたArFエキシマレーザ感光用のレジストパターン108を形成する。

図4(b)において図面の左方向がウエハ101の中心方向(内側)であるとし、レジストパターン108をマスクとして、反射防止膜105及びシリコン窒化膜105に対してドライエッチングを始めると、レジストパターン108の内側に堆積する第1の堆積物107Aは、その外側に堆積する第2の堆積物107Bと比べて厚く付着する。なお、互いに隣接するライン同士の間隔(スペース)が不均衡に配置されているパターンの場合は、堆積物の付着量は必然的に不均衡となる。

次に、図4(c)に示すように、互いに厚さが異なる第1及び第2の堆積物107A、107Bが付着したレジストパターン108が温度上昇により収縮すると、堆積量が少ない第2の堆積物107Bによるレジストに対する耐応力強度とレジスト自体の耐応力強度とが収縮による応力よりも小さい場合にレジスト倒れが発生し、この状態でエッチングを続けると、図4(d)に示す状態となる。

この現象に基づいて、図5(a)～図5(d)を参照しながらレジスト倒れを

防止する第１の知見を説明する。

まず、図５（ａ）に示すように、ウエハ１０１上のシリコン窒化膜１０４の上に、反射防止膜１０５を介在させたＡｒＦエキシマレーザ感光用のレジストパターン１０８を形成する。

次に、図５（ｂ）に示すように、例えば図１に示したエッチング条件Ｄのように、反射防止膜１０５及びシリコン窒化膜１０５に対して側壁堆積物が著しく多くなるようなドライエッチング行なう。このようにすると、レジストパターン１０８の外側に堆積する第２の堆積物１０７Ｂの堆積量も多くなる。

これにより、図５（ｃ）のように、レジストパターン１０８に収縮が起こった場合でも、第２の堆積物１０７Ｂには耐応力強度が十分に増しているため、レジストパターン１０８の収縮応力に耐え得る。その結果、倒れずに収縮したレジストパターン１０８をマスクとして、さらにエッチングを進行すると、図５（ｄ）に示すように、レジスト倒れを生じることなく回路パターンを形成できる。但し、この場合には、その応力に耐え得る強度分の厚さを持つ堆積物１０７Ａ、１０７Ｂの堆積量に相当する寸法変換差が生じることになる。

次に、図６（ａ）～図６（ｄ）を参照しながらレジスト倒れを防止する第２の知見を説明する。

まず、図６（ａ）に示すように、ウエハ１０１上のシリコン窒化膜１０４の上に、反射防止膜１０５を介在させたＡｒＦエキシマレーザ感光用のレジストパターン１０８を形成する。

次に、図６（ｂ）に示すように、例えば図１に示したエッチング条件Ｂ、Ｅのように、反射防止膜１０５及びシリコン窒化膜１０５に対して側壁堆積物がほとんど付着しないようなドライエッチング行なう。従って、この場合は、レジストパターン１０８の両側壁に堆積物が不均衡に付着することはない。

次に、図６（ｃ）に示すように、エッチング中にレジストパターン１０８が収縮したとしても、側壁堆積物の堆積量の差による耐応力強度に差が生じないため、レジストパターン１０８にはレジスト倒れを起こす応力が掛からない。但し、レジストパターン１０８の断面形状が逆テーパのような倒れやすい形状になっていないことが前提である。

次に、図 6 (d) に示すように、倒れずに収縮したレジストパターン 108 をマスクとして、さらにエッチングを進行すると、レジスト倒れを生じることなく回路パターンを形成できる。

なお、レジストパターン 101 におけるウエハ 101 の径方向に対して平行な側面を有する部分の両側面上に堆積する側壁堆積物は、もともと不均衡とはならないため、問題とならない。

本発明に係るパターン形成方法は、これらの知見に基づいてなされ、ドライエッチング中にレジストパターンの側壁堆積物を応力に耐えられる程度にまで厚くするか、又は側壁堆積物をほとんど堆積させないエッチング条件でドライエッチングを行なう。

具体的に、本発明に係る第 1 のパターン形成方法は、ウエハ上に被エッチング膜を形成する第 1 の工程と、被エッチング膜の上に、A r F エキシマレーザ光又はそれよりも短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを形成する第 2 の工程と、レジストパターンをマスクとして、被エッチング膜に対してエッチングを行なう第 3 の工程とを備え、第 3 の工程は、被エッチング膜に対して、レジストパターンにおける少なくともウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面上に、相対的に厚い堆積物を堆積しながらエッチングする。

第 1 のパターン形成方法によると、レジストパターンが熱収縮を起こしたとしても、レジストパターンの両側面上には相対的に厚い堆積物の耐応力強度が増すと共にほぼ均衡が取れて、レジスト倒れを防止することができるため、被エッチング膜に異方性形状を得ることができるようになる。

第 1 のパターン形成方法において、第 3 の工程は、被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも大きくなるようにエッチングすることが好ましい。

第 1 のパターン形成方法において、被エッチング膜におけるパターン寸法の寸法変換差は、+20%～+80%であることが好ましい。

本発明に係る第 2 のパターン形成方法は、ウエハ上に被エッチング膜を形成する第 1 の工程と、被エッチング膜の上に、A r F エキシマレーザ光又はそれより

も短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを形成する第2の工程と、レジストパターンをマスクとして、被エッチング膜に対してエッチングを行なう第3の工程とを備え、第3の工程は、被エッチング膜に対して、レジストパターンにおける少なくともウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面上に、堆積物が堆積しないようにエッチングする。

第2のパターン形成方法によると、レジストパターンが熱収縮を起こしたとしても、レジストパターンの両側面上には堆積物が堆積せず、レジストパターンに掛かる応力が不均衡とならないため、レジスト倒れを防止することができ、その結果、被エッチング膜に異方性形状を得ることができるようになる。

第2のパターン形成方法において、第3の工程は、被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも小さくなるようにエッチングすることが好ましい。

この場合に、被エッチング膜におけるパターン寸法の寸法変換差は、 $\pm 0\% \sim -30\%$ であることが好ましい。

本発明に係る第3のパターン形成方法は、被エッチング膜を形成する第1の工程と、被エッチング膜の上に、A r Fエキシマレーザ光又はそれよりも短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを形成する第2の工程と、レジストパターンをマスクとして、被エッチング膜に対してエッチングを行なう第3の工程とを備え、第3の工程は、被エッチング膜に対して、レジストパターンの両側面上に、相対的に厚い堆積物を堆積しながらエッチングを行なう工程（a）と、被エッチング膜に対して、レジストパターンの両側面上に堆積物が堆積しないようにエッチングを行なう工程（b）とを含む。

第3のパターン形成方法によると、工程（a）において、相対的に厚い堆積物により寸法変換差の値が大きくなったとしても、次の工程（b）において寸法変換差の値が負となるので、所望の加工寸法を得ることができる。

第3のパターン形成方法において、被エッチング膜はウエハ上に形成されており、レジストパターンの両側面は、該レジストパターンにおける少なくともウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面であることが好ましい。

この場合の第3の工程における工程（a）は、被エッチング膜におけるエッチ

ング後のパターン寸法が所定の寸法よりも大きくなるようにエッチングし、第3の工程における工程（b）は、被エッチング膜に対するエッチング条件を堆積物がエッチングされるように設定して、被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも小さくなるようにエッチングすることが好ましい。

この場合に、被エッチング膜におけるパターン寸法の寸法変換差は、 $\pm 0\% \sim +20\%$ であることが好ましい。

第1又は第3のパターン形成方法において、被エッチング膜は、シリコン若しくはシリコン化合物又はカーボン若しくはカーボン化合物からなり、第3の工程における相対的に厚い堆積物を堆積しながら行なうエッチングは、エッチングを進行させる第1のエッチングガスには SF_6 を用い、レジストパターンの側面上に堆積物を生じさせる第2のエッチングガスには、 CF_4 、 CHF_3 、 CH_2F_2 及び CH_4 のうちの少なくとも1つを用い、第1のエッチングガス及び第2のエッチングガスを希釈する希釈ガスには、 Ar 、 He 、 Ne 又は Xe を用いることが好ましい。

第2又は第3のパターン形成方法において、被エッチング膜は、シリコン若しくはシリコン化合物又はカーボン若しくはカーボン化合物からなり、第3の工程における堆積物が堆積しないように行なうエッチングは、エッチングを進行させる第1のエッチングガスである SF_6 と、エッチングを進行させると共に堆積物をも生じさせる第2のエッチングガスである CF_4 又は CHF_3 と、堆積物を生じさせる第3のエッチングガスである CH_2F_2 及び CH_4 のうちの少なくとも1つと、堆積物をエッチングする第4のエッチングガスである SF_6 、 O_2 、 O_3 、 CO 及び CO_2 のうちの少なくとも1つとのうち、第1のエッチングガス若しくは第2のエッチングガスと、第3のエッチングガスと、第4のエッチングガスとを組み合わせた第1の混合ガスを用いるか、又は第1のエッチングガス若しくは第2のエッチングガスと、第4のエッチングガスとを組み合わせた第2の混合ガスを用い、第1の混合ガス及び第2の混合ガスを希釈する希釈ガスには、 Ar 、 He 、 Ne 又は Xe を用いることが好ましい。

【図面の簡単な説明】

図 1 は A r F エキシマレーザ感光用レジストを用いた場合のエッチング条件ごとのレジストパターン寸法の初期値と寸法変換差との関係、及び寸法変換差とレジスト倒れとの関係を示すグラフである。

図 2 は比較用であって、K r F エキシマレーザ感光用レジストを用いた場合のエッチング条件ごとのレジストパターン寸法の初期値と寸法変換差との関係を示すグラフである。

図 3 (a) 及び図 3 (b) はウエハの主面上におけるラインパターンの配置方向を示す模式的な平面図である。

図 4 は A r F エキシマレーザ感光用レジストを用いた場合のパターン形成工程におけるレジスト倒れの発生の様子を示す工程順の構成断面図である。

図 5 は本発明に係る A r F エキシマレーザ感光用レジストを用いた場合のパターン形成工程におけるレジスト倒れを防止する第 1 の方法を示す工程順の構成断面図である。

図 6 は本発明に係る A r F エキシマレーザ感光用レジストを用いた場合のパターン形成工程におけるレジスト倒れを防止する第 2 の方法を示す工程順の構成断面図である。

図 7 は本発明のパターン形成方法に用いるドライエッチング装置を示す構成断面図である。

図 8 は本発明の第 1 の実施形態に係るパターン形成方法を示すウエハの工程順の部分的な構成断面図である。

図 9 は本発明の第 2 の実施形態に係るパターン形成方法を示すウエハの工程順の部分的な構成断面図である。

図 1 0 は本発明の第 3 の実施形態に係るパターン形成方法を示すウエハの工程順の部分的な構成断面図である。

図 1 1 は従来のパターン形成方法を示す工程順の構成断面図である。

【発明の詳細な説明】

(第 1 の実施形態)

まず、本発明の第 1 の実施形態に係るパターン形成方法に用いるドライエッチ

ング装置の概略を説明する。

図7に示すドライエッチング装置は、UHF (Ultra High Frequency) - ECR (Electron Cyclotron Resonance) プラズマ方式を採るドライエッチング装置であって、図7に示すように、反応室51には、上部電極保持部材52に保持され、表裏方向に貫通する複数の孔部53aが形成された上部電極53と、保持台54の上に保持されており、その上面にウエハ11を載置して保持する下部電極55とが互いに間隔をおき且つ対向して設けられている。

上部電極53は第1の高周波電源56と電氣的に接続され、下部電極55は第2の高周波電源57と電氣的に接続されている。

反応室51の上部には、上部電極保持部材52及び上部電極53を覆う蓋部材58が気密に設けられている。蓋部材58の内部には、ガス導入孔58aが設けられており、その出口は上部電極53の上方に開口している。

蓋部材58の上で且つ上部電極53の中央部の上方には、電磁波を伝播する導波管59が設けられ、該導波管59における蓋部材58の反対側の端部には、UHF波を発振する電磁波発振機60が接続されている。

反応室51の側面の下部には、該反応室51内のガスを排気する排気口61が設けられており、該排気口61に設けられた排気ポンプ62により、反応室51が所定の真空状態に保たれる。

下部電極55を保持する保持台54は、その下部を支持部材63により支持されており、該支持部材63は、ウエハ11の位置が反応室51内に生成されるプラズマ密度に対して最適な位置となるように、保持台54を上下に移動させる機構を有している。

以下、前述した構成を持つドライエッチング装置を用いて、被エッチング膜から、ライン幅が100nmのレジストパターンにより寸法変換差の値が30nm程度の回路パターンを得る例について図面を参照しながら詳細に説明する。

図8(a)～図8(d)は本発明の第1の実施形態に係るパターン形成方法におけるウエハの工程順の部分的な断面構成を示している。

まず、図8(a)に示すように、シリコンからなるウエハ11の上に、例えば熱酸化法又は気相成長法により、厚さが約20nmのシリコン酸化膜12を形成

し、続いて、シリコン酸化膜 12 の上に、例えば化学的気相成長 (CVD) 法により、厚さが約 20 nm のポリシリコン膜 13 と、厚さが約 120 nm のシリコン窒化膜 14 とを順次成膜する。その後、シリコン窒化膜 14 の上に、露光光の反射を防止する反射防止膜 15 を形成する。反射防止膜 15 は、例えばプラズマ CVD 法によるシリコン酸窒化膜からなり、その膜厚は約 40 nm が適当である。また、反射防止膜 15 には、塗布法による有機膜を用いることもでき、その場合の膜厚は約 80 nm が適当である。続いて、反射防止膜 15 の上に、ArF エキシマレーザ感光用のレジスト膜 16A を約 400 nm の厚さで塗布し、レジスト膜 16A の上方に、半導体装置の回路パターンが形成されたフォトマスク（図示せず）を整列させた後、該フォトマスクを通過した露光光によってレジスト膜 16A を露光する。

次に、図 8 (b) に示すように、露光されたレジスト膜 16A を現像してレジストパターン 16 を形成する。ここで、レジストパターン 16A は、ウエハ 11 の径方向に対して垂直な方向に延びる部分の断面を示している。

次に、図 8 (c) に示すように、レジストパターン 16 が形成されたウエハ 11 をドライエッチング装置に投入し、レジストパターン 16 をエッチングマスクとして、反射防止膜 15 及びシリコン窒化膜 14 に対してドライエッチングを行なう。このときのエッチングガスには、例えば、六フッ化イオウ (SF_6)、トリフルオロメタン (CHF_3)、及びアルゴン (Ar) の混合ガスを使用する。

反応性ガスとこれを希釈する非反応性ガスとの比、すなわち ($\text{SF}_6 + \text{CHF}_3$) / Ar の値は 0.04 ~ 0.1 の範囲で制御し、六フッ化イオウとトリフルオロメタンとの比 ($\text{SF}_6 / \text{CHF}_3$) の値は 1 ~ 2.5 の範囲で制御する。

反応室 51 の圧力は 0.5 Pa ~ 4 Pa の範囲で制御し、電磁波発振機 60 が発振する UHF 波の電力は 200 W ~ 1000 W の範囲で制御し、上部電極 53 に印加する RF 電力は 100 W ~ 800 W の範囲で制御し、下部電極 55 に印加する RF 電力は 50 W ~ 800 W の範囲で制御する。

下部電極 55 の温度は $-20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲で制御し、反応室 51 の壁面の温度は $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で制御し、上部電極 53 と下電極 55 との間隔は 10 mm ~ 120 mm の範囲で制御する。

第1の実施形態においては、寸法変換差が30nm程度となるようにエッチング条件を設定する。

以下に、その詳細例を列挙する。

- ・ 反応性ガス (SF_6) の流量 : 40ml/min
- ・ 反応性ガス (CHF_3) の流量 : 20ml/min
- ・ 希釈ガス (Ar) の流量 : 1000ml/min
- ・ 反応室の圧力 : 2Pa
- ・ UHF波の電力 : 600W
- ・ 上部電極に対するRF電力 : 400W
- ・ 下部電極に対するRF電力 : 150W
- ・ 下部電極の温度 : 20°C
- ・ 反応室の壁面温度 : 30°C
- ・ 電極間距離 : 30mm

このエッチング条件によって、図8(c)に示すように、レジストパターン16の内側に堆積する第1の堆積物17Aとその外側に堆積する第2の堆積物17Bとのいずれもが相対的に厚く付着する。

その結果、図8(d)に示すように、レジストパターン16がエッチング中にイオンにさらされることにより収縮したとしても、該レジストパターン16の両側面上に対向して堆積する第1の堆積物17A及び第2の堆積物17Bの厚さがほぼ均衡しているため、両堆積物17A、17Bの耐応力強度も均衡が取れるので、レジスト倒れが生じることがない。

また、寸法変換差の値を30nmよりも大きくする場合であっても、上記のエッチング条件におけるパラメータ値を所定の制御範囲で変更することにより、同様にレジスト倒れを防止することができるため、所望の加工寸法を実現できる。

(第2の実施形態)

以下、本発明の第2の実施形態であって、図7に示したドライエッチング装置を用いて、被エッチング膜からライン幅が100nmのレジストパターンにより寸法変換差の値が-10nm程度の回路パターンを得るパターン形成方法について図面を参照しながら説明する。

図9（a）～図9（d）は本発明の第2の実施形態に係るパターン形成方法におけるウエハの工程順の部分的な断面構成を示している。

まず、図9（a）に示すように、シリコンからなるウエハ11の上に、例えば熱酸化法又は気相成長法により、厚さが約20nmのシリコン酸化膜12を形成し、続いて、シリコン酸化膜12の上に、例えばCVD法により、厚さが約20nmのポリシリコン膜13と、厚さが約120nmのシリコン窒化膜14とを順次成膜する。その後、シリコン窒化膜14の上に、露光光の反射を防止する反射防止膜15を形成する。反射防止膜15は、例えばプラズマCVD法によるシリコン酸窒化膜からなり、その膜厚は約40nmが適当である。また、反射防止膜15には、塗布法による有機膜を用いることもでき、その場合の膜厚は約80nmが適当である。続いて、反射防止膜15の上に、ArFエキシマレーザ感光用のレジスト膜16Aを約400nmの厚さで塗布し、レジスト膜16Aの上方に、半導体装置の回路パターンが形成されたフォトマスク（図示せず）を整列させた後、該フォトマスクを通過した露光光によってレジスト膜16Aを露光する。

次に、図9（b）に示すように、露光されたレジスト膜16Aを現像してレジストパターン16を形成する。ここでも、レジストパターン16Aは、ウエハ11の径方向に対して垂直な方向に延びる部分の断面を示している。

次に、図9（c）に示すように、レジストパターン16が形成されたウエハ11をドライエッチング装置に投入し、レジストパターン16をエッチングマスクとして、反射防止膜15及びシリコン窒化膜14に対してドライエッチングを行なう。このときのエッチングガスには、例えば、酸素（ O_2 ）、トリフルオロメタン（ CHF_3 ）及びアルゴン（Ar）の混合ガスを使用する。

反応性ガスとこれを希釈する非反応性ガスとの比、すなわち（ $O_2 + CHF_3$ ）／Arの値は0.02～0.1の範囲で制御し、酸素とトリフルオロメタンとの比（ O_2 / CHF_3 ）の値は0.1～1の範囲で制御する。

反応室51の圧力は0.5Pa～4Paの範囲で制御し、電磁波発振機60が発振するUHF波の電力は200W～1000Wの範囲で制御し、上部電極53に印加するRF電力は100W～800Wの範囲で制御し、下部電極55に印加するRF電力は50W～800Wの範囲で制御する。

下部電極 55 の温度は $-20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ の範囲で制御し、反応室 51 の壁面の温度は $0^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ の範囲で制御し、上部電極 53 と下電極 55 との間隔は $10\text{ mm} \sim 120\text{ mm}$ の範囲で制御する。

第 2 の実施形態においては、寸法変換差が -10 nm 程度となるようにエッチング条件を設定する。

以下に、その詳細例を列挙する。

- ・ 反応性ガス (CHF_3) の流量 : 60 ml/min
- ・ 反応性ガス (O_2) の流量 : 20 ml/min
- ・ 希釈ガス (Ar) の流量 : 1000 ml/min
- ・ 反応室の圧力 : 2 Pa
- ・ UHF 波の電力 : 600 W
- ・ 上部電極に対する RF 電力 : 400 W
- ・ 下部電極に対する RF 電力 : 200 W
- ・ 下部電極の温度 : 20°C
- ・ 反応室の壁面温度 : 30°C
- ・ 電極間距離 : 90 mm

このエッチング条件を用いることによって、図 9 (c) に示すように、レジストパターン 16 の両側壁にはほとんど堆積物が付着しない。

その結果、図 9 (d) に示すように、レジストパターン 16 がエッチング中にイオンにさらされることにより収縮したとしても、該レジストパターン 16 にかかる収縮応力は両側面で均衡しているため、レジスト倒れが生じることがない。

また、寸法変換差の値を -10 nm よりも絶対値で大きくする場合であっても、上記のエッチング条件におけるパラメータ値を所定の制御範囲で変更することにより、レジスト倒れを防止することができ、従って、所望の加工寸法を実現できる。

(第 3 の実施形態)

以下、本発明の第 3 の実施形態であって、図 7 に示したドライエッチング装置を用いて、被エッチング膜から、ライン幅が 100 nm のレジストパターンにより寸法変換差の値がほぼ 0 nm の回路パターンを得るパターン形成方法について

図面を参照しながら説明する。

図10(a)～図10(d)は本発明の第3の実施形態に係るパターン形成方法におけるウエハの工程順の部分的な断面構成を示している。

まず、図10(a)に示すように、シリコンからなるウエハ11の上に、例えば熱酸化法又は気相成長法により、厚さが約20nmのシリコン酸化膜12を形成し、続いて、シリコン酸化膜12の上に、例えばCVD法により、厚さが約20nmのポリシリコン膜13と、厚さが約100nmのシリコン窒化膜14とを順次成膜する。その後、シリコン窒化膜14の上に、露光光の反射を防止する反射防止膜15を形成する。反射防止膜15は、例えばプラズマCVD法によるシリコン酸窒化膜からなり、その膜厚は約35nmが適当である。また、反射防止膜15には、塗布法による有機膜を用いることもでき、その場合の膜厚は約80nmが適当である。続いて、反射防止膜15の上に、ArFエキシマレーザ感光用のレジスト膜16Aを約400nmの厚さで塗布し、レジスト膜16Aの上方に、半導体装置の回路パターンが形成されたフォトマスク（図示せず）を整列させた後、該フォトマスクを通過した露光光によってレジスト膜16Aを露光する。

次に、図10(b)に示すように、露光されたレジスト膜16Aを現像してレジストパターン16を形成する。ここでも、レジストパターン16Aは、ウエハ11の径方向に対して垂直な方向に延びる部分の断面を示している。

次に、図10(c)に示すように、レジストパターン16が形成されたウエハ11をドライエッチング装置に投入し、レジストパターン16をエッチングマスクとして、反射防止膜15及びシリコン窒化膜14に対してドライエッチングを行なう。第3の実施形態においては、シリコン窒化膜14に対するエッチングが70nm程度進行した時点で、該シリコン窒化膜14に対するエッチングを一旦停止する。このときのエッチングガスには、第1の実施形態と同様に、例えば、六フッ化イオウ(SF_6)、トリフルオロメタン(CHF_3)、及びアルゴン(Ar)の混合ガスを使用する。

反応性ガスとこれを希釈する非反応性ガスとの比、すなわち($\text{SF}_6 + \text{CHF}_3$)/Arの値は0.04～0.1の範囲で制御し、六フッ化イオウとトリフルオロメタンとの比($\text{SF}_6 / \text{CHF}_3$)の値は1～2.5の範囲で制御する。

反応室 51 の圧力は $0.5 \text{ Pa} \sim 4 \text{ Pa}$ の範囲で制御し、電磁波発振機 60 が発振する UHF 波の電力は $200 \text{ W} \sim 1000 \text{ W}$ の範囲で制御し、上部電極 53 に印加する RF 電力は $100 \text{ W} \sim 800 \text{ W}$ の範囲で制御し、下部電極 55 に印加する RF 電力は $50 \text{ W} \sim 800 \text{ W}$ の範囲で制御する。

下部電極 55 の温度は $-20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲で制御し、反応室 51 の壁面の温度は $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で制御し、上部電極 53 と下部電極 55 との間隔は $10 \text{ mm} \sim 120 \text{ mm}$ の範囲で制御する。

シリコン窒化膜 14 の下部を残す第 1 段階のエッチング工程においては、第 1 の実施形態と同様に、寸法変換差が 30 nm 以上となるようなエッチング条件を用いる。

例えば、寸法変換差が 30 nm の場合には、

- ・ 反応性ガス (SF_6) の流量 : 40 ml/min
- ・ 反応性ガス (CHF_3) の流量 : 20 ml/min
- ・ 希釈ガス (Ar) の流量 : 1000 ml/min
- ・ 反応室の圧力 : 2 Pa
- ・ UHF 波の電力 : 600 W
- ・ 上部電極に対する RF 電力 : 400 W
- ・ 下部電極に対する RF 電力 : 150 W
- ・ 下部電極の温度 : 20°C
- ・ 反応室の壁面温度 : 30°C
- ・ 電極間距離 : 30 mm

このエッチング条件によって、図 10 (c) に示すように、レジストパターン 16 の内側に堆積する第 1 の堆積物 17 A とその外側に堆積する第 2 の堆積物 17 B とのいずれもが相対的に厚く付着する。

次に、図 10 (d) に示すように、第 1 の堆積物 17 A 及び第 2 の堆積物 17 B が付着しない条件、すなわちこれらの堆積物 17 A、17 B がエッチングされる条件、さらに言い換えれば、寸法変換差が負となるエッチング条件で残りのシリコン窒化膜 14 に対するエッチングを再開して、シリコン窒化膜 14 から所望の回路パターンを形成する。このときのエッチングガスには、第 2 の実施形態と

同様に、例えば、酸素 (O_2)、トリフルオロメタン (CHF_3) 及びアルゴン (Ar) の混合ガスを使用する。

反応性ガスとこれを希釈する非反応性ガスとの比、すなわち ($O_2 + CHF_3$) / Ar の値は 0.02 ~ 0.1 の範囲で制御し、酸素とトリフルオロメタンとの比 (O_2 / CHF_3) の値は 0.1 ~ 1 の範囲で制御する。

第3の実施形態においては、最終的な寸法変換差の値であるほぼ 0 nm を得られるように各エッチングパラメータ値を変更する。例えば、この第2段階のエッチング工程においては寸法変換差が -30 nm 以上となるように各エッチングパラメータ値を設定する。

以下に、その詳細例を列挙する。

- ・ 反応性ガス (O_2) の流量 : 30 ml / min
- ・ 反応性ガス (CHF_3) の流量 : 60 ml / min
- ・ 希釈ガス (Ar) の流量 : 1000 ml / min
- ・ 反応室の圧力 : 2 Pa
- ・ UHF 波の電力 : 400 W
- ・ 上部電極に対する RF 電力 : 400 W
- ・ 下部電極に対する RF 電力 : 300 W
- ・ 下部電極の温度 : 20 °C
- ・ 反応室の壁面温度 : 30 °C
- ・ 電極間距離 : 30 mm

このように、寸法変換差の値をほぼ 0 nm とする第3の実施形態においては、図 10 (c) に示すように、シリコン窒化膜 14 に対して、一旦寸法変換差を正の値に大きくする第1段階のエッチングを行ない、その後、寸法変換差を負とする第2段階のエッチングを行なうことにより、レジスト倒れを防止することができるため、寸法変換差がほぼ 0 となる回路パターンを得ることができる。

同様に、所望の寸法変換差の値が 0 nm ~ 30 nm の場合には、第1段階における正の寸法変換差の値と、第2段階における負の寸法変換差との和が所望の寸法変換差の値となるように、各エッチング工程のパラメータ値を変更すると良い。

なお、第3の実施形態とは逆に、第1段階のエッチング工程において、一旦寸

法変換差が負の値となるエッチング、すなわちレジストパターン16の両側面上に堆積物が堆積しないようなエッチングを行ない、その後、第2段階のエッチング工程において寸法変換差が正の値となる、すなわちレジストパターン16の両側面上に比較的厚い堆積物17A、17Bを堆積するようなエッチングを行ない、且つ第1段階の寸法変換差と第2段階の寸法変換差との和が所望の値となるようなエッチング条件を選ぶことにより、レジスト倒れを防止することができる。その結果、所望の寸法を持つ回路パターンを確実に形成することができる。

また、第1及び第3の各実施形態においては、レジストパターン16の幅寸法を堆積物によって大きくする、すなわち太らせるエッチングガスとして、六フッ化イオウ (SF_6)、トリフルオロメタン (CHF_3) 及びアルゴン (Ar) を含む混合ガスを用いたが、トリフルオロメタン (CHF_3) に限らず、メタン (CH_4) やテトラフルオロカーボン (CF_4)、さらには、 C_4F_8 、 C_2F_6 、 C_4F_6 、 C_5F_8 等のフルオロカーボン (C_xF_y) や、ジフルオロメタン (CH_2F_2) 等のヒドロフルオロカーボン (CH_xF_y 、但し、 $0 \leq x, y \leq 4$ 、 $x + y = 4$) を用いても同様の効果を得られる。なお、 CH_xF_y は水素の組成 x が小さいほどシリコン窒化膜14に対するエッチング作用が強くなり、また組成 x が大きいほど堆積物の堆積量が増大する。ここで、 SF_6 は窒化シリコン及び側壁堆積物をエッチングするエッチャントである。また、希釈ガスには、アルゴン (Ar) に代えて、ヘリウム (He)、ネオン (Ne) 又はキセノン (Xe) 等の不活性ガスを用いてもよい。

また、第2及び第3の各実施形態においては、レジストパターン16の側面上に堆積物を堆積しないエッチングガスとして、酸素 (O_2)、トリフルオロメタン (CHF_3) 及びアルゴン (Ar) の混合ガスを用いたが、酸素に代えて、オゾン (O_3)、一酸化炭素 (CO) 又は二酸化炭素 (CO_2) 等のガスを用いても同様の効果を得られる。酸素原子は側壁堆積物をエッチングするエッチャントである。また、トリフルオロメタン (CHF_3) には、フルオロカーボン類 (CH_xF_y 、 C_xF_y) を用いてもよい。

さらには、酸素 (O_2)、トリフルオロメタン (CHF_3) 及びアルゴン (Ar) の組み合わせ以外にも、六フッ化イオウ (SF_6) とアルゴン (Ar) との

組み合わせ、又はテトラフルオロカーボン（ CF_4 ）とアルゴン（ Ar ）との組み合わせでもよい。また、六フッ化イオウ（ SF_6 ）は被エッチング膜と堆積物との双方をエッチングするため、酸素と同時に添加してもよい。

また、被エッチング膜に窒化シリコンを用いたが、酸化シリコンであっても同等の効果をを得ることができる。さらには、シリコン化合物に限らず、エッチングガスを適当に選べば、半導体製造プロセスに適合する、種々の半導体材料、導電性材料及び絶縁材料に適用できる。

また、各実施形態においては、図7に示すUHF-ECRプラズマ方式のドライエッチング装置を用いてエッチングを行なったが、これに代えて、例えば、RIE（Reactive Ion Etching）、ICP（Inductively Coupled Plasma）、TCP（Transformer Coupled Plasma）、又はDPS（Decoupled Plasma Source）方式等のプラズマ源を有するドライエッチング装置を用いても同様の効果を得られることはいうまでもない。

また、各実施形態においては、レジスト膜16Aの材料に、ArFエキシマレーザ感光用レジストを用いたが、これに限られない。すなわち、ArFエキシマレーザ光か又はそれよりも短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材料であれば、同等の効果をを得ることができる。具体的には、ノボラック等のベンゼン環系樹脂を含まないレジスト材料や、線幅が130nmよりも小さいパターンを形成するためのレジスト材料であって、ArFエキシマレーザ感光用のレジスト材料と同程度の強度を持つレジスト材であれば、同等の効果を奏する。

【クレーム】

1. パターン形成方法は、

ウエハ上に被エッチング膜を形成する第1の工程と、

前記被エッチング膜の上に、ArFエキシマレーザ光又はそれよりも短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを形成する第2の工程と、

前記レジストパターンをマスクとして、前記被エッチング膜に対してエッチングを行なう第3の工程とを備え、

前記第3の工程は、前記被エッチング膜に対して、前記レジストパターンにおける少なくとも前記ウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面上に、相対的に厚い堆積物を堆積しながらエッチングする。

2. クレーム1のパターン形成方法は、

前記第3の工程において、前記被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも大きくなるようにエッチングする。

3. クレーム2のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜におけるパターン寸法の寸法変換差は、+20%～+80%である。

4. クレーム1のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜は、シリコン若しくはシリコン化合物又はカーボン若しくはカーボン化合物からなり、

前記第3の工程における相対的に厚い堆積物を堆積しながら行なうエッチングは、

エッチングを進行させる第1のエッチングガスにはSF₆を用い、

前記レジストパターンの側面上に前記堆積物を生じさせる第2のエッチングガスには、CF₄、CHF₃、CH₂F₂及びCH₄のうちの少なくとも1つを用い、

前記第1のエッチングガス及び第2のエッチングガスを希釈する希釈ガスには、Ar、He、N又はXeを用いる。

5. パターン形成方法は、

ウエハ上に被エッチング膜を形成する第1の工程と、

前記被エッチング膜の上に、ArFエキシマレーザ光又はそれよりも短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを形成する第2の工程と、

前記レジストパターンをマスクとして、前記被エッチング膜に対してエッチングを行なう第3の工程とを備え、

前記第3の工程は、前記被エッチング膜に対して、前記レジストパターンにおける少なくとも前記ウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面上に、堆積物が堆積しないようにエッチングする。

6. クレーム5のパターン形成方法は、

前記第3の工程において、前記被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも小さくなるようにエッチングする。

7. クレーム6のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜におけるパターン寸法の寸法変換差は、 $\pm 0\% \sim -30\%$ である。

8. クレーム5のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜は、シリコン若しくはシリコン化合物又はカーボン若しくはカーボン化合物からなり、

前記第3の工程における堆積物が堆積しないように行なうエッチングは、

エッチングを進行させる第1のエッチングガスである SF_6 と、エッチングを進行させると共に堆積物をも生じさせる第2のエッチングガスである CF_4 又は CHF_3 と、堆積物を生じさせる第3のエッチングガスである CH_2F_2 及び CH_4 のうちの少なくとも1つと、堆積物をエッチングする第4のエッチングガスである SF_6 、 O_2 、 O_3 、 CO 及び CO_2 のうちの少なくとも1つとのうち、

前記第1のエッチングガス若しくは第2のエッチングガスと、前記第3のエッチングガスと、前記第4のエッチングガスとを組み合わせた第1の混合ガスを用いるか、

又は、前記第１のエッチングガス若しくは第２のエッチングガスと、前記第４のエッチングガスとを組み合わせた第２の混合ガスを用い、

前記第１の混合ガス及び第２の混合ガスを希釈する希釈ガスには、Ar、He、Ne、又はXeを用いる。

９．パターン形成方法は、

被エッチング膜を形成する第１の工程と、

前記被エッチング膜の上に、ArFエキシマレーザ光又はそれよりも短い波長を持つ露光光に感光するレジスト材からなるレジストパターンを形成する第２の工程と、

前記レジストパターンをマスクとして、前記被エッチング膜に対してエッチングを行なう第３の工程とを備え、

前記第３の工程は、前記被エッチング膜に対して、前記レジストパターンの両側面上に、相対的に厚い堆積物を堆積しながらエッチングを行なう工程

(a)と、

前記被エッチング膜に対して、前記レジストパターンの両側面上に堆積物が堆積しないようにエッチングを行なう工程(b)とを含む。

１０．クレーム９のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜はウエハ上に形成されており、

前記レジストパターンの両側面は、該レジストパターンにおける少なくとも前記ウエハの径方向に対して垂直な側面を有する部分の両側面である。

１１．クレーム１０のパターン形成方法は、

前記第３の工程における工程(a)において、前記被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも大きくなるようにエッチングし、

前記第３の工程における工程(b)において、前記被エッチング膜に対するエッチング条件を前記堆積物がエッチングされるように設定して、前記被エッチング膜におけるエッチング後のパターン寸法が所定の寸法よりも小さくなるようにエッチングする。

12. クレーム11のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜におけるパターン寸法の寸法変換差は、 $\pm 0\% \sim +20\%$ である。

13. クレーム9のパターン形成方法において、

前記被エッチング膜は、シリコン若しくはシリコン化合物又はカーボン若しくはカーボン化合物からなり、

前記第3の工程における相対的に厚い堆積物を堆積しながら行なうエッチングは、

エッチングを進行させる第1のエッチングガスには SF_6 を用い、

前記レジストパターンの側面上に前記堆積物を生じさせる第2のエッチングガスには、 CF_4 、 CHF_3 、 CH_2F_2 及び CH_4 のうちの少なくとも1つを用い、

前記第1のエッチングガス及び第2のエッチングガスを希釈する希釈ガスには、 Ar 、 He 、 Ne 又は Xe を用いる。

14. クレーム9のパターン形成方法は、

前記被エッチング膜は、シリコン若しくはシリコン化合物又はカーボン若しくはカーボン化合物からなり、

前記第3の工程における堆積物が堆積しないように行なうエッチングは、

エッチングを進行させる第1のエッチングガスである SF_6 と、エッチングを進行させると共に堆積物をも生じさせる第2のエッチングガスである CF_4 又は CHF_3 と、堆積物を生じさせる第3のエッチングガスである CH_2F_2 及び CH_4 のうちの少なくとも1つと、堆積物をエッチングする第4のエッチングガスである SF_6 、 O_2 、 O_3 、 CO 及び CO_2 のうちの少なくとも1つとのうち、

前記第1のエッチングガス若しくは第2のエッチングガスと、前記第3のエッチングガスと、前記第4のエッチングガスとを組み合わせた第1の混合ガスを用いるか、

又は、前記第1のエッチングガス若しくは第2のエッチングガスと、前記第4のエッチングガスとを組み合わせた第2の混合ガスを用い、

前記第 1 の混合ガス及び第 2 の混合ガスを希釈する希釈ガスには、A r、H e、N e、又はX eを用いる。

【アブストラクト】

レジストパターンが形成されたウエハをドライエッチング装置に投入し、レジストパターンをエッチングマスクとして、反射防止膜及びシリコン窒化膜に対してドライエッチングを行なう。これにより、ウエハの中心に対して、レジストパターンの内側に堆積する第1の堆積物とその外側に堆積する第2の堆積物のいずれもが相対的に厚く付着する。このときのエッチングガスには、 SF_6 、 CHF_3 及びArの混合ガスを用いる。